

ESCUELA DE GRADUADOS EN INGENIERIA PORTUARIA

CATEDRA

INGENIERIA DE DRAGADO

PROFESOR TITULAR

ING. RAUL S. ESCALANTE

Abril 2017

TEMA 10

DRAGA DE SUCCIÓN POR ARRASTRE

CÁLCULO DE PRODUCCIÓN

ÍNDICE

10	<u>DRAGA DE SUCCIÓN POR ARRASTRE – CÁLCULO DE PRODUCCIÓN</u>
10.1	CONSIDERACIONES GENERALES
10.2	MÉTODOS PARA LLENAR LA CÁNTARA
10.3	CICLO DE DRAGADO
10.3.1	<u>Fase 1: Fin del llenado de la cántara</u>
10.3.2	<u>Fase 2: Navegación hacia el área de descarga</u>
10.3.3	<u>Fase 3: Descarga de la draga</u>
10.3.3.1	Descarga por compuertas de fondo
10.3.3.2	Descarga por tubería
10.3.3.3	Descarga mediante chorro de proa
10.3.3.4	Descarga mediante tubos de succión
10.3.4	<u>Fase 4: Navegación de regreso</u>
10.3.5	<u>Fase 5: Carga de la draga – Etapa de dragado</u>
10.3.6	<u>Fase 6: Descarga por vertedero</u>
10.3.7	<u>Fase 7: Máximo calado</u>
10.3.8	<u>Fase 8: Erosión</u>
10.3.8.1	Materiales granulares
10.3.8.2	Materiales finos
10.3.8.3	Terminación del fondo
10.3.9	<u>Tiempo de giro - Turning</u>
10.4	ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN LA ETAPA DE PROYECTO
10.5	DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN LA ETAPA DE OBRA
10.5.1	<u>Comparación de relevamientos batimétricos</u>
10.3.1	<u>Medición de caudales y concentraciones en tuberías</u>
10.3.2	<u>Estimación de caudales y concentraciones en los vertederos</u>
10.3.3	<u>Medición en cántara</u>
10.3.4	<u>Método TDS</u>
10.3.5	<u>Medición en sitios de descarga</u>
10.6	PAYLOAD
10.6.1	<u>Toneladas de suelo seco (TDS)</u>
10.6.2	<u>Volumen de suelo “in situ”</u>
10.6.3	<u>Volumen de suelo en la cántara ya esponjado</u>
10.7	CÁLCULO DEL TIEMPO ÓPTIMO DE DRAGADO
10.7.1	<u>Procedimiento gráfico</u>
10.7.2	<u>Procedimiento numérico</u>
10.7.3	<u>Procedimiento computacional</u>
10.7.4	<u>Inspector Silencioso (SI)</u>
10.8	BIBLIOGRAFÍA

INDICE DE FIGURAS

Figura 10.1	Fases del ciclo de dragado
Figura 10.2	Ciclo de dragado
Figura 10.3	Ciclo de dragado según Miedema
Figura 10.4	Llenado de la cántara
Figura 10.5	Tiempo óptimo de bombeo
Figura 10.6	Comparación producción cabezal Wild Dragon y convencional
Figura 10.7	Comparación aplicación método de la tangente a medición de carga por desplazamiento o TDS
Figura 10.8	Pantalla Silent Inspector

INDICE DE TABLAS

Tabla 10.1	Cálculo de producción
Tabla 10.2	Formulario ENG 2590 original
Tabla 10.3	Cálculo tiempo óptimo de dragado

10 CÁLCULO DE PRODUCCIÓN

10.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Tenemos diversas situaciones en las que requerimos conocer la cantidad de material dragado mediante una draga de succión por arrastre. Por un lado, tenemos la situación cuando se programa un trabajo de dragado en el que se piensa utilizar una draga de succión por arrastre. Debe realizarse una estimación de la producción que se va a obtener con el equipo seleccionado para esa obra. Por otra parte, tenemos la situación cuando se está ejecutando la obra y debe realizarse la certificación de la misma. Necesitamos determinar la cantidad de material dragado.

El tema es de fundamental importancia, pero no es de fácil solución y es objeto de numerosos estudios. Para su consideración veremos primero el ciclo de dragado y consideraremos luego diversas situaciones y maneras de determinar la producción de una draga de succión por arrastre.

Una excelente referencia para este tema es Miedema (2012). El Profesor Dr. Ir. Sape A. Miedema de la Delft University of Technology es autor de numerosas publicaciones relacionadas con los procesos de sedimentación que se producen al llenar la cántara de una draga de succión por arrastre. En la publicación citada, que se puede conseguir online desarrolla el tema con muchísima profundidad. Los alumnos que deseen profundizar el tema pueden referirse a esta publicación. El autor desarrolla modelos que se utilizan para estimar la sedimentación en la cántara durante los procesos de dragado.

10.2 METODOS PARA LLENAR LA CANTARA

Miedema (2012) indica que hay dos métodos principales para llenar la cántara.

Un método es el Sistema de Volumen Constante (CVS). Este sistema tiene un nivel de vertedero fijo de manera que el volumen efectivo de la cántara es constante. En este caso la draga se diseña para cargar la cantara con sedimento con una densidad de $1,9 - 2,0 \text{ ton/m}^3$

El otro método es el Sistema de Tonelaje Constante (CTS). Este sistema tiene un nivel de vertedero ajustable. La cántara se diseña para una densidad del sedimento de $1,3 - 1,7 \text{ ton/m}^3$ en combinación con un tonelaje máximo. Cuando el contenido de la cántara alcanza el tonelaje máximo se baja el nivel del vertedero de manera de mantener el peso del contenido de la cántara constante. Este sistema tiene algunas ventajas tales como que se puede alcanzar la máxima carga más rápido que con el sistema CVS dado que se tienen las bombas lo más bajo posible proveyendo una densidad mayor de la mezcla.

10.3 CICLO DE DRAGADO

Los trabajos de dragado con equipos de succión en marcha se pueden considerar como una serie continua de ciclos de dragados sencillos. Cada ciclo de dragado consiste en diferentes fases ejecutadas una después de otra. Las diferentes etapas a considerar se presentan en la Figura 10.1

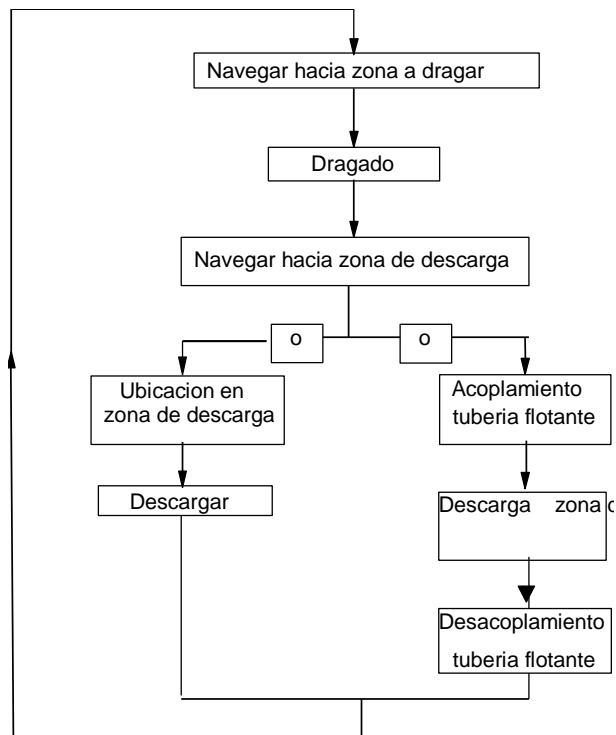


Figura 10.1 – Etapas del ciclo de dragado

En la Figura 10.2 se representa el ciclo de dragado

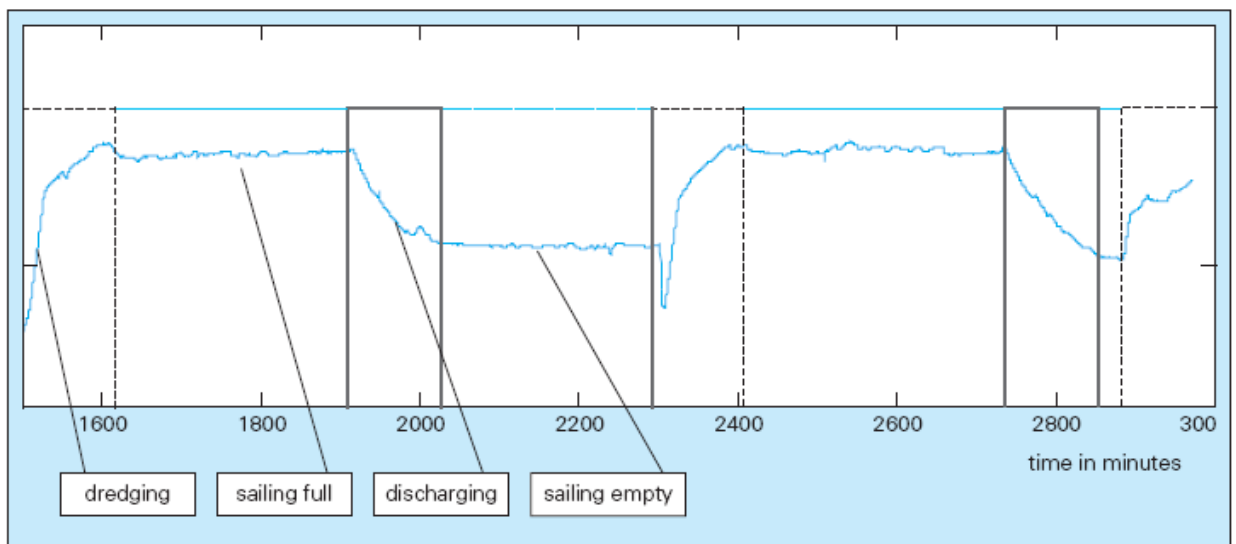


Figure 2. Displacement and status signals versus operational time.

Figura 10. 2 – Ciclo de dragado [Hahlbrock (1998)]

Se considera que el ciclo comienza cuando la cántara está llena con sedimento y la draga comienza a navegar hacia el área de descarga. Este punto en el ciclo de dragado se elige como punto inicial a los efectos de poder determinar la carga óptima en un gráfico como se muestra en la Figura 10.4

Miedema (2012) propone distinguir ocho fases dentro del ciclo de dragado de la draga de succión por arrastre. En este apunte se va a seguir esa diferenciación de fases ampliando los detalles cuando corresponda. En las Figuras 10.3 y 10.4 se representan las fases indicadas.

10.3.1 Fase 1: Fin del llenado de la cántara

El agua por encima del nivel de vertedero fluye por el vertedero. El vertedero se baja hasta el nivel de sedimento de manera que el agua excedente pueda fluir. De esta manera se logra disminuir el calado. En la Figura 10.2 puede apreciarse que al

finalizar la fase de dragado y comenzar la navegación con la draga cargada se produce una pequeña disminución del desplazamiento. Esto es debido a que se elimina el agua sobrante al comienzo del viaje.

Comienza la navegación hacia el área de descarga.

10.3.2 Fase 2: Navegación hacia el área de descarga

Se navega hacia el área de descarga. El tiempo de navegación con la draga cargada depende de la velocidad de la draga y la distancia a la que se encuentra el sitio de descarga. La primera opción sería de navegar con la máxima velocidad. Sin embargo, hay que tener en cuenta los precios del combustible y en las épocas de altos precios del combustible puede ser más económico en el ciclo total navegar a una velocidad menor a la máxima pero que optimice la relación precio/tiempo. Con las grandes dragas que se utilizan en la actualidad las distancias a los cuales puede ir la draga a buscar material están aumentando. Puede hablarse de distancias de más de 50 Km.

10.3.3 Fase 3: Descarga de la draga

El tiempo de descarga depende del método que se utilice para la descarga. En el caso de la draga de succión por arrastre hay varias posibilidades

10.3.3.2 Descarga por compuertas de fondo

La descarga mediante compuertas de fondo es muy rápida y puede llevar de 5 a 10 minutos. Puede extenderse un poco más en el caso en que por problemas de profundidad deba realizarse una predescarga mediante compuertas de descarga previa.

10.3.3.3 Descarga por tubería

Cuando el objeto del dragado es realizar rellenos de terrenos o de playas la descarga de la draga se efectúa mediante tuberías. Para ello se conecta una tubería flexible, flotante al dispositivo de proa preparado para ello, se vincula esta tubería flotante a otro tramo de tubería rígida, normalmente sumergida y apoyada en el fondo y se bombea el material. Para mayor facilidad de bombeo el material se mezcla con agua mediante chorros en la cántara para hacerlo una mezcla fluida. La operación de anclar la draga, conectar la tubería y realizar el bombeo del material lleva más tiempo que el de descarga de fondo. Podemos indicar una hora como tiempo típico de bombeo

10.3.3.4 Descarga mediante el chorro de proa

La descarga mediante el chorro de proa es muy utilizada para la realización de rellenos. La draga se acerca al lugar de descarga y lanza hasta unos 100 m de distancia una mezcla fluida de agua y arena. Este método lleva más tiempo que con la descarga de fondo, pero un poco menos que la descarga por tubería

10.3.3.5 Descarga mediante los tubos de succión

En algunas oportunidades como en el caso de tener que rellenar una trinchera a bastante profundidad puede ser eficiente utilizar los tubos de succión para descargar con precisión el material en el sitio predeterminado. Un ejemplo se puede apreciar en el tapado de las tuberías para gas en el Mar del Norte

10.3.4 Fase 4: Navegación de regreso

Opcionalmente se puede realizar el bombeo del agua remanente en la cántara e iniciar la navegación hacia el área de dragado. La navegación con la draga en lastre depende de la velocidad de la draga y de la distancia al lugar de dragado. La draga puede llevar una cantidad de agua en la cántara a los fines de navegar en forma estable.

La sedimentación en la cántara ocurre en las etapas 5, 6, 7 y 8

10.3.5 Fase 5: Carga de la draga – Etapa de dragado

La draga llega a la zona de dragado y antes de comenzar con la tarea de dragado procede a vaciar el agua de lastre de la cántara. Este aspecto se refleja en la Figura 10.2 donde se ve una disminución del desplazamiento justo antes de empezar la fase de dragado.

Se bajan los tubos de succión para que tomen contacto con el fondo mientras la draga continúa navegando a una velocidad de 2 a 3 nudos con respecto al fondo. Es muy importante que la velocidad con respecto al suelo sea siempre positiva para evitar que los tubos de succión puedan apoyarse contra el fondo en dirección contraria. En los primeros instantes puede derivarse la mezcla con una concentración menor a la deseada directamente por encima de la borda (ALMOB)

La cántara se llena con una mezcla de agua y suelo por medio de las bombas de dragado. La capacidad de succión de las bombas se utiliza al máximo para llenar la cántara en el menor tiempo posible. La velocidad de la draga, la presión de los cabezales sobre el fondo y el tipo de cabezal se adecuan al tipo de suelo que se está dragando para obtener la máxima concentración de sólidos. El comportamiento de la mezcla de agua y suelo al entrar en la cántara depende del tipo de suelo que se trate.

El proceso de dragado se controla por medio de un sistema computarizado automático muy sofisticado junto con operadores altamente calificados. El timonel y el operador trabajan en conjunto durante el proceso de dragado. Todos los parámetros importantes tal como la producción, posicionamiento, posición del cabezal, ángulos de los tubos de succión, carga de la cántara, etc, se controlan continuamente por medio de computadoras y sistemas guardando estos datos en discos duros.

Se llena la cántara con la mezcla de agua y sedimento hasta el nivel de vertedero. En esta fase se asume que el 100 % del sedimento permanece en la cántara y sedimenta.

10.3.6 Fase 6: Descarga por vertedero

Se continúa la carga de la cántara por encima del nivel de vertedero y se comienza a verter el agua excedente por el vertedero. Se considera que las pérdidas de material son mínimas. Durante esta fase un porcentaje de las partículas se sedimentan en la cántara. El porcentaje depende de la curva granulométrica del material. Durante esta fase la erosión no tiene mucha influencia en el proceso de sedimentación.

10.3.7 Fase 7: Máximo calado

Cuando se alcanza el máximo peso del contenido de la cántara el nivel de vertedero se hace descender en forma continua de manera de mantener el peso del

contenido de la cántara constante en su valor máximo trabajando con el sistema CTS – Sistema de Tonelaje Constante.

10.3.8 Fase 8: Erosión

El nivel de sedimento se va elevando en la cántara a causa de la sedimentación y la velocidad del flujo por encima del sedimento aumenta produciendo erosión que pone en resuspensión las partículas sedimentadas. Esta es la causa de un incremento rápido de las pérdidas por vertedero.

Las Figuras 10.3 y 10.4 muestran la carga total, la carga efectiva, el TDS y las pérdidas por vertedero durante las fases mencionadas. Si observamos la Figura 10.4 se aprecia que la transición entre las etapas 5 y 6 así como la transición entre las etapas 6 y 7 es muy abrupta en el gráfico de carga total pero que no se evidencia en el gráfico de carga efectiva. Sin embargo, la transición entre las etapas 7 y 8 no es necesariamente muy abrupta. El momento en que se produce esta transición depende de la distribución granulométrica del suelo dragado.

Con arenas muy finas esta transición va a estar cerca de la transición entre las fases 6 y 7, así que la fase 7 es muy corta o puede directamente no ocurrir.

Con arenas muy gruesas y gravas la erosión es mínima por lo que la fase 8 difícilmente ocurra. En este caso el nivel del sedimento actual puede ser mas alto que el nivel de vertedero.

La manera en que cada fase ocurre en el ciclo depende de las características de la draga, el método de trabajo y por supuesto del tipo de material a dragar.

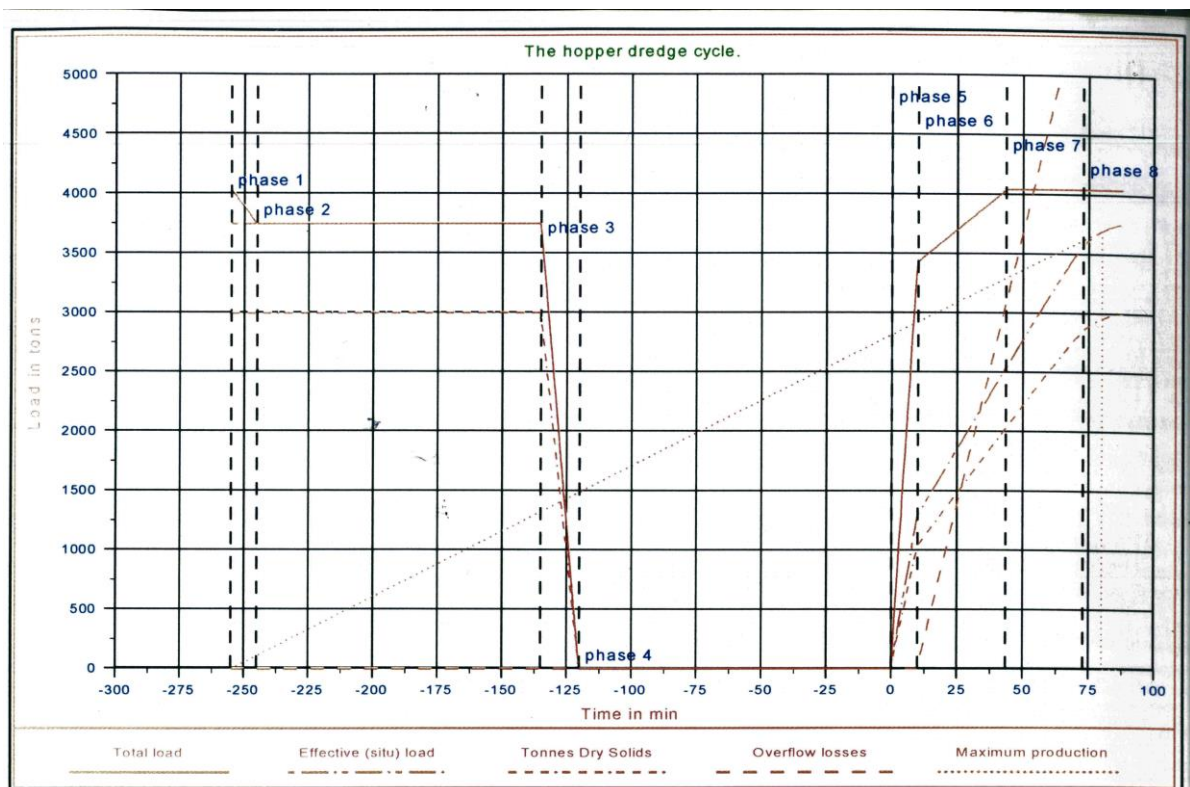


Figura 10.3 – Ciclo de dragado según Miedema (2012)

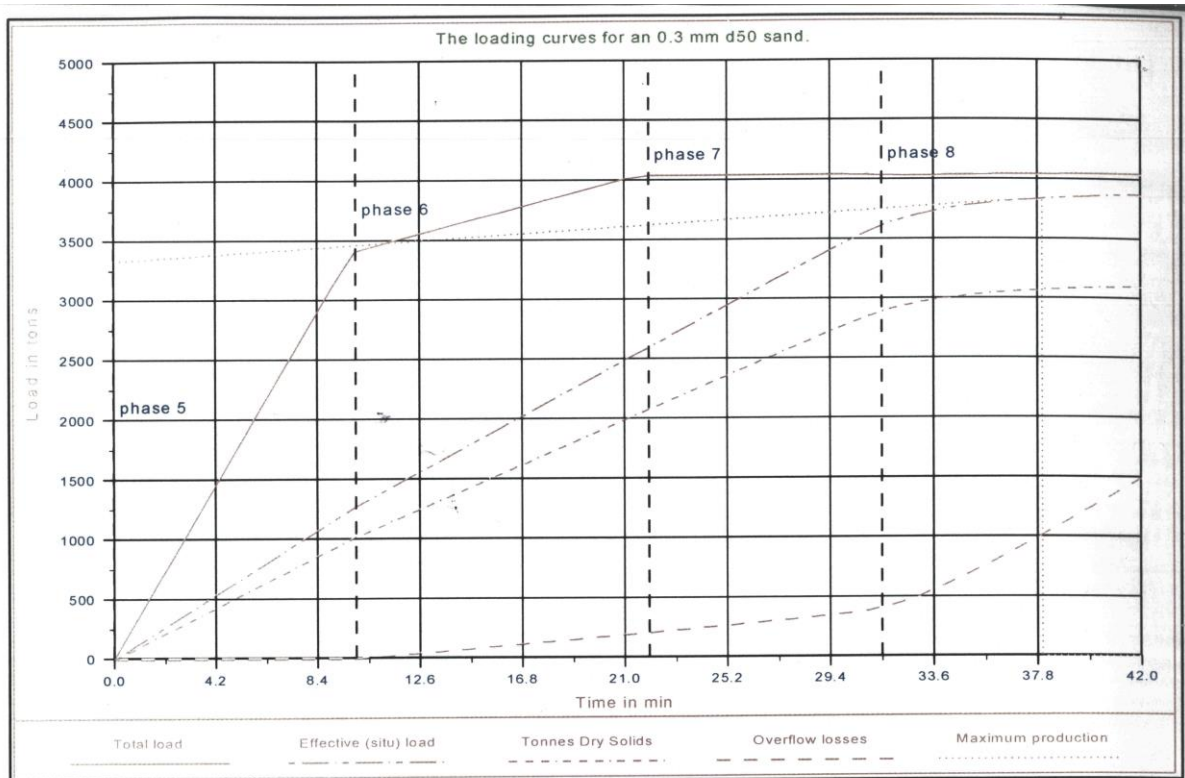


Figura 10.4 – Llenado de la cántara

10.3.8.1 Materiales granulares

Los materiales granulares, por ejemplo, arenas finas, tienden a decantar rápidamente a medida que se va llenando la cántara y se produce una separación de fases donde la parte con mayor concentración de sólidos se deposita en el fondo de la cántara y la parte con mayor contenido de agua queda en la parte superior. En este caso cuando se llena la cántara hasta el nivel del vertedero se continúa dragando de manera que el agua con poco contenido de sólidos salga de la cántara y sea reemplazada por la mezcla con mayor contenido de sólidos. Este proceso se continúa hasta que el hundimiento de la draga por el peso de la carga transportada llegue al valor permitido. Teniendo en cuenta el valor de densidad de diseño de la cántara se suele poner el vertedero en una posición baja para no exceder el peso que puede transportar la draga. En este caso la draga va con el peso máximo (down)

10.3.8.2 Materiales finos

Los materiales finos, por ejemplo, limos, tienden a permanecer en suspensión en la cántara por tiempos más prolongados que los que lleva efectuar el dragado. Por lo tanto, una vez que se llena la draga con la mezcla de agua y sedimento, el material que empieza a salir por el vertedero puede tener una concentración muy similar a la del material que está siendo bombeado. Por ello y teniendo en cuenta que el mayor tiempo de bombeo no va a aportar mayor tonelaje de carga, es que se prefiere terminar el dragado una vez llena la cántara y navegar hasta el sitio de descarga. En este caso el vertedero se coloca lo mas alto posible. La draga va a navegar con la cántara totalmente llena (full) pero no con la carga máxima

10.3.8.3 Terminación del fondo

Dragar con una draga de succión por arrastre significa que los cabezales de dragado tienen que interactuar con las irregularidades del fondo. La fuerza sobre los tubos de succión puede cambiar en pocos segundos de cero a valores que sobrepasen los valores nominales lo que puede forzar el cabezal de dragado en direcciones no deseadas. Esto es problemático, particularmente durante la última fase del dragado, la pasada de limpieza, donde se deben remover los últimos montículos y crestas de los surcos dejados por el cabezal

Se realiza siempre un intento sistemático de profundizar el fondo antes de hacer la pasada de limpieza. Si se debe realizar el trabajo en pasadas paralelas, debido al ancho a dragar, hay una tendencia natural de los cabezales a seguir la huella previa. El resultado es que se desarrollan en el fondo surcos con crestas longitudinales. Se realiza un intento de guiar el cabezal sobre estas crestas, pero el cabezal tiende a desplazarse lateralmente y volver a la huella. Un remedio es dragar en forma oblicua sobre las crestas existentes, pero esto exige que haya suficiente espacio para maniobrar y siempre quedarán montículos de suelo.

10.3.9 Tiempo de giro – Turning

Hay que tener en cuenta que la draga debe girar para volver al sitio de descarga. por lo que es necesario contar con zonas del canal o del área de dragado con ancho suficiente para realizar esta maniobra. El ancho mínimo necesario se reduce cuando la draga está equipada con hélice de proa, característica que es muy habitual en las dragas de succión por arrastre. Los anchos mínimos que necesita la draga son de 4 esloras para el caso de no contar con hélice de proa y 2,5 esloras para los casos que tiene hélice de proa. Debe considerarse que la draga puede estar en lastre o sea con calado reducido al momento de hacer la maniobra.

La longitud del área a dragar es otro aspecto importante. Para dragas de succión por arrastre tramos menores a 1.000 m pueden considerarse como restrictivos y tramos inferiores a 250 m exigen modificar el método de dragado para obtener resultados satisfactorios.

Si el tramo a dragar no es suficientemente largo como para que la cántara se llene en un solo recorrido, se debe girar la draga para continuar con el dragado. Lo difícil de la vuelta y el número de veces que haya que dar vuelta aumentan el tiempo no productivo. Por este motivo en la programación de dragado se trata de tener tramos de longitud suficiente.

10.4 ESTIMACION DE LA PRODUCCIÓN EN LA ETAPA DE PROYECTO

En la etapa de proyecto de una obra de dragado o de oferta en una licitación es necesario realizar estimaciones de la producción que van a tener los equipos propuestos.

Esta estimación es de fundamental importancia pues da como resultado el tiempo de ocupación de los equipos para un volumen determinado o la cantidad de equipos necesarios si hay un plazo pre establecido. En ambos casos es el elemento fundamental que determina el presupuesto de la obra. Por este motivo debe estudiarse con mucho cuidado.

En general se cuenta con todos los datos de proyecto, especialmente los referidos a tipo de suelo a dragar, volúmenes, ubicación geográfica de la obra y la zona de

descarga y todos los detalles técnicos necesarios. En base a esta información se realiza la selección del equipo de dragado a utilizar y en base a la experiencia del Consultor o de la empresa dragadora y rendimientos tipo de los equipos se efectúa el cálculo.

	Distancia descarga	Vel. Nudos	Tiempo de Nav.	Tiempo Desc.	Tiempo de Transporte	Tiempo de dragado	Giros	Tiempo Trabajado	Demoras	Tiempo de demoras	Ciclo	Draga	Volumen efectivo	Produccion Mensual
Zona	km		Min	Min	Min	Min	Min	Min	%	Min	Min		m ³	m ³ /mes
Zona 1	3,5	6,5	35	10	45	45		90	15%	16	106	M	2800	1.158.300
Zona 2	8,0	6,5	80	10	90	45	5	140	15%	25	165	M	2200	585.000
Zona 3	4,5	6,5	45	10	55	45		100	15%	18	118	P	1600	595.700

Tabla 10.1 – Cálculo de producción

En la Tabla 10.1 se muestra un ejemplo para el caso de dragado de mantenimiento de un canal de navegación con zonas de descarga ubicadas a distancias determinadas. El tiempo de navegación indicado corresponde para la navegación ida y vuelta al sitio de descarga. La producción mensual está determinada calculando el número de ciclos por día que corresponde a cada duración total del ciclo por el total de días del mes.

10.5 DETERMINACIÓN DE PRODUCCIÓN EN LA ETAPA DE OBRA

En la etapa de obra la determinación de la producción implica constatar el grado de cumplimiento del Contratista y habilitar el pago de certificados de obra. Por ello es importante que este aspecto esté claramente especificado en el contrato incluido el procedimiento a utilizar.

Existen diversos métodos que pueden aplicarse de acuerdo al tipo de obra en ejecución, el tipo de contrato y las modalidades del caso. Es importante destacar que la determinación del volumen de obra realizado no es un procedimiento exacto y que la aplicación de diversos métodos da diferencias en los resultados que suelen estar dentro de lo esperable por las imprecisiones en la determinación de los factores utilizados en los cálculos.

10.5.1 Comparación de relevamientos batimétricos

La determinación del volumen dragado en un intervalo de tiempo en un determinado lugar mediante comparación de relevamientos batimétricos efectuados uno antes de la ejecución del dragado (relevamiento de predragado) y otro después de finalizado el mismo (relevamiento de post dragado) es un método muy tradicional que presenta una serie de ventajas y desventajas.

Por un lado debe tenerse presente que los relevamientos batimétricos presentan una cierta imprecisión dada por la sumatoria de factores que intervienen para la determinación de la posición exacta de un punto con sus coordenadas x,y,z medidas a partir de una embarcación que flota en un medio acuático que cambia de nivel y con un instrumento (ecosonda) que es objeto de calibraciones diarias. Por este motivo se acepta que un buen relevamiento presenta una imprecisión del orden de medio pie (15 cm).

Esto implica que cuando el intervalo entre relevamientos es corto o por algún motivo el volumen dragado implica un pequeño incremento de profundidad, la

determinación de volúmenes mediante la comparación de relevamientos puede dar resultados bastante alejados de la realidad.

El otro caso que se puede presentar es que se produzca una fuerte sedimentación durante el tiempo que se efectúa el dragado. En este caso la comparación de relevamientos da una valoración de la diferencia entre la situación final menos la inicial, pero el volumen adicional que ha sido necesario remover para llegar a la situación final debido a la sedimentación no se refleja en este método.

Hay ocasiones o ubicaciones donde no se puede utilizar la comparación entre relevamientos a los efectos de la certificación:

- en los ingresos marítimos con la presencia de barras muy dinámicas desde el punto de vista sedimentológico.
- en zonas con mucho contenido de barro fluido (fondos lodosos) que afecten el eco de la ecosonda. En barros muy fluidos, pequeños cambios en los seteos de la ecosonda pueden producir grandes cambios en la posición del eco, y por lo tanto en la determinación de la profundidad.

Un aspecto importante es la manera de realizar los cálculos de volumen. Un método muy utilizado es tomar los perfiles transversales y multiplicarlos por la separación entre perfiles. En este caso juega un papel muy importante la separación entre perfiles. Separaciones entre perfiles usuales son cada 200 m, cada 100 m y nunca mas cercanos que perfiles cada 50 m. En este caso se acepta que el fondo es uniforme entre perfiles.

Otra manera técnicamente mas adecuada es aplicar un modelo digital de terreno (DTM) a la situación predragado y postdragado y calcular la diferencia de volúmenes.

Una ventaja que presenta este método para el Comitente es que refleja el estado final de la zona a dragar, pero puede no reflejar el trabajo efectivamente realizado

10.5.2 Medición de caudales y concentraciones en las tuberías

La medición de caudales en tuberías es una operación rutinaria. Asimismo, se puede determinar las concentraciones. Con estos datos puede calcularse el caudal sólido transportado. Ver Hahlbrock (1998)

10.5.3 Estimación de caudales y concentraciones en los vertederos

Puede realizarse una estimación del volumen total erogado por los vertederos. Asimismo, puede determinarse la concentración del material mediante toma de muestras. Esta operación no es sencilla de realizar.

10.5.4 Medición en cántara

La cantidad de arena depositada en el fondo se determina mediante mediciones en distintos puntos de la cántara. Asimismo, se determina la concentración del material restante mediante toma de muestras. La producción diaria se obtiene por la suma del contenido de la cántara en cada ciclo completo multiplicada por el número de ciclos.

El método de medición en cántara se denomina también “de media esfera y centrifuga”. Este método consiste en introducir una media esfera en la cántara en lugares predeterminados para determinar el volumen de material que tenga

densidad superior a 1.200 kg/m³. La media esfera está diseñada para flotar en un material con una densidad del material de 1,200 kg/m³. El material adicional que se encuentra por encima de esta interfase se muestrea a media altura de la columna y el porcentaje de sólidos que contiene se determina mediante centrifugación de las muestras.

El inconveniente que presenta este método es que en la actualidad las técnicas de dragado permiten obtener materiales dragados con densidades superiores a 1,200 kg/m³ y este método no ofrece ningún incentivo al Contratista para conseguir densidades mayores.

10.5.5 Método TDS

El método denominado TDS (Tons of Dry Solids) consiste en la determinación de las toneladas de suelo seco dragadas [Rosati (2000)] La primera aplicación del método se realizó en el Puerto de Rotterdam y posteriormente fue adoptado por el Cuerpo de Ingenieros de los EEUU.

Este método es muy útil cuando la comparación de relevamientos hidrográficos no presenta la precisión suficiente para determinar el trabajo realizado por un Contratista como se indicó anteriormente.

La teoría del TDS se basa en el volumen y peso de la cántara. Para calcular el TDS se necesita:

- ρ_{agua}
- $\rho_{\text{suelo seco}}$
- volumen de la cántara
- peso de la cántara (del buque)

Para evaluar la precisión del método TDS debemos determinar la precisión con la que podemos determinar estos factores

La precisión y repetibilidad del TDS debe compararse con la precisión y repetibilidad de otros métodos, tales como la comparación de relevamientos batimétricos.

Si denominamos P al porcentaje de volumen ocupado por el suelo en la cántara tenemos:

$$P \cdot \rho_{\text{suelo}} + (1 - P) \rho_{\text{agua}} = \rho_{\text{hopper}}$$

$$P = \frac{\rho_{\text{hopper}} - \rho_{\text{agua}}}{\rho_{\text{suelo}} - \rho_{\text{agua}}}$$

$$\text{TDS} = P \cdot \rho_{\text{suelo}} \cdot V$$

Se desarrolla un ejemplo numérico en el párrafo 10.6

El nivel de instrumentación que presentan los equipos de dragado en la actualidad permite realizar numerosos controles.

En la referencia citada [Rosati(2000)] se analiza la influencia de la medición y la precisión del método.

El método TDS fue desarrollado por el Ministerio de Obras Públicas de Holanda para el control de los trabajos de dragado de mantenimiento en los canales de navegación del Puerto de Rotterdam. Su desarrollo permitió reemplazar el método de medición en cántara denominado de media esfera y centrífuga que se utilizaba como base de pago a los contratistas.

10.5.6 Medición en sitios de descarga

Cuando se está realizando un relleno lo que puede interesarle al Comitente es el perfil del terreno terminado con determinadas características de compactación. En ese caso el Contratista debe aportar la cantidad de material necesario para cumplir con el perfil de diseño

10.6 PAYLOAD

La carga total de suelo transportada se denomina “payload” haciendo una semejanza con la carga útil de los buques. Este cálculo se puede hacer de diferentes formas.

10.6.1 Toneladas de suelo seco (TDS)

Una forma es el calcular el peso de suelo seco TDS (tons of dry solids)

Supongamos

$$\text{Volumen de cántara } V_c = 3.000 \text{ m}^3$$

$$\text{Carga total } Pt = 4.800 \text{ ton}$$

Este peso total se puede obtener por la variación de desplazamiento de la draga

$\rho_{\text{suelo}} = \rho_{\text{arena}} = 2,65 \text{ ton/m}^3$. Este peso específico corresponde a las partículas del material.

$$\rho_{\text{agua}} = 1 \text{ ton/m}^3$$

La incógnita a despejar es el volumen de suelo seco (V_s)

$$\rho_{\text{suelo}} \cdot V_s + \rho_{\text{agua}} \cdot V_a = \text{carga total} = 4.800 \text{ ton}$$

$$2,65 \cdot V_s + 1 \cdot (3.000 - V_s) = 4.800$$

$$V_s (2.65 - 1) = 4.800 - 3.000 = 1.800$$

$$V_s = 1.800 / 1.65 = 1091 \text{ m}^3$$

El peso de ese volumen es

$$\text{TDS} = V_s \cdot \rho_{\text{suelo}} = 1.091 \cdot 2.65 = 2891 \text{ ton}$$

10.6.2 Volumen de suelo “in situ”

Podemos repetir el cálculo para determinar el equivalente de material in situ. Necesitamos conocer $\rho_{\text{insitu}} = 2.00 \text{ ton/m}^3$. Este peso específico corresponde al suelo saturado con todos los espacios vacíos llenos de agua

$$V_{\text{in situ}} = 1.800 \text{ m}^3 ;$$

$$\text{Peso} = 1.800 \cdot 2 = 3.600 \text{ ton}$$

10.6.3 Volumen de suelo en la cántara ya esponjado

El suelo extraído de su lugar sufre un esponjamiento. Para este ejemplo el factor de esponjamiento puede ser 1.25

$$V_s \text{ esponjado} = 1.800 \cdot 1,25 = 2250 \text{ m}^3$$

Este volumen se compone de

$$1.800 \text{ m}^3 \text{ de peso específico igual a } 2,00$$

$$450 \text{ m}^3 \text{ de agua adicional con peso específico igual a } 1.00$$

$$1800 \cdot 2.00 = 3.600$$

$$450 \cdot 1 = 450$$

$$\text{Peso total} = 4.050 \text{ ton}$$

10.7 CALCULO DEL TIEMPO ÓPTIMO DE DRAGADO

Optimizar el ciclo de dragado significa realizar la máxima producción en un tiempo determinado. De las fases que componen el ciclo de dragado la única que presenta posibilidades de optimización es la fase específica de dragado. Hay varios enfoques para optimizar esta fase del ciclo. Cerca del final de la fase de dragado la mayor parte del material que ingresa a la cántara la abandona por el vertedero, por lo que permanece en la cántara una mínima parte. La pregunta es si este pequeño incremento de carga justifica el tiempo extra que se necesita para conseguirlo. En otras palabras, la pregunta es cuando debe interrumpirse el proceso de dragado y navegar a la zona de descarga.

10.7.1 Procedimiento gráfico

A los efectos de determinar el momento óptimo para interrumpir el dragado es habitual utilizar un procedimiento gráfico que tiene en cuenta el tiempo total del ciclo y la forma que toma la curva que refleja el incremento de carga en la cántara en función del tiempo. En la Figura 10.5 se indica la curva de carga en función del tiempo para un caso determinado. La curva crece en forma lineal hasta que alcanza el nivel de vertedero y a partir de allí se achata a medida que mayor cantidad de material sale por el vertedero. En la curva se indica que llevó 60 minutos ir al sitio de descarga, descargar y volver. Si trazamos una tangente a la curva de carga con origen en tiempo 0 el punto que corresponde a minuto 100 o sea, 40 minutos de carga nos da la carga óptima y el momento en el que debe cesar el bombeo. En este punto la carga de la draga por unidad de tiempo alcanza su máximo. En el ejemplo para el tiempo de bombeo igual a 40 minutos tenemos una carga de 2.500 toneladas. Esto nos da un promedio de 25 toneladas/minuto tomando los 100 minutos de tiempo total del ciclo. En este momento conviene detener el bombeo e iniciar el viaje al sitio de descarga.

Efectivamente si tomamos la carga de material y la dividimos en el tiempo total del ciclo nos da un valor de producción media que es superior a cualquier otro ya fuera tomando un punto anterior de la curva o posterior.

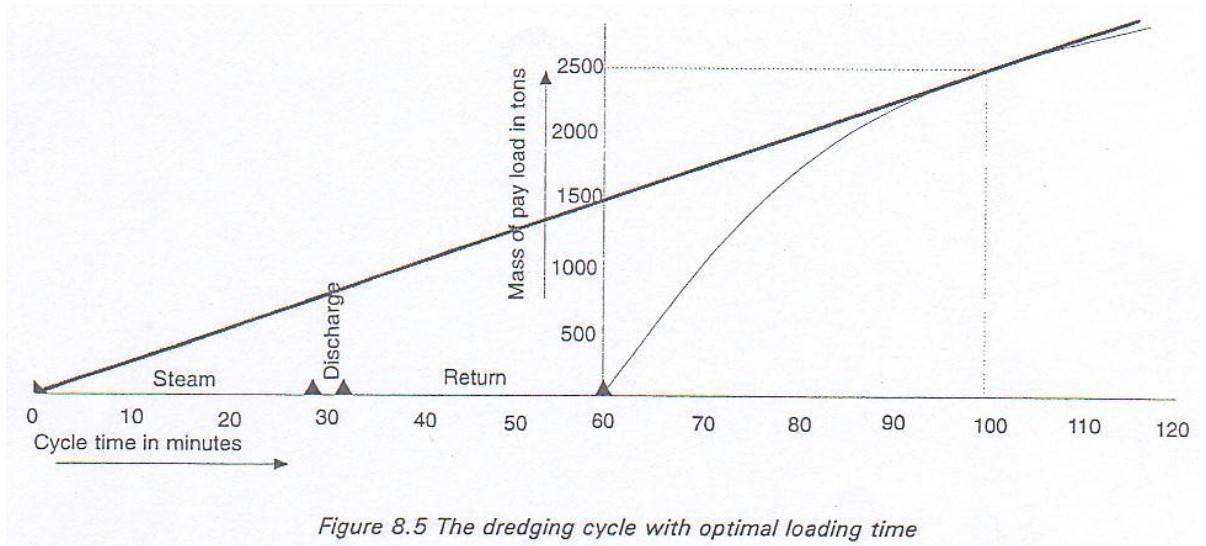


Figure 8.5 The dredging cycle with optimal loading time
 Figura 10.5 - Tiempo óptimo de bombeo

En la Figura 10.6 se muestra un gráfico con el ciclo de dragado para la carga de la cántara con un cabezal Wild Dragon y con un cabezal convencional. Se indica la diferencia en tiempo óptimo de dragado dada por el cabezal Wild Dragon

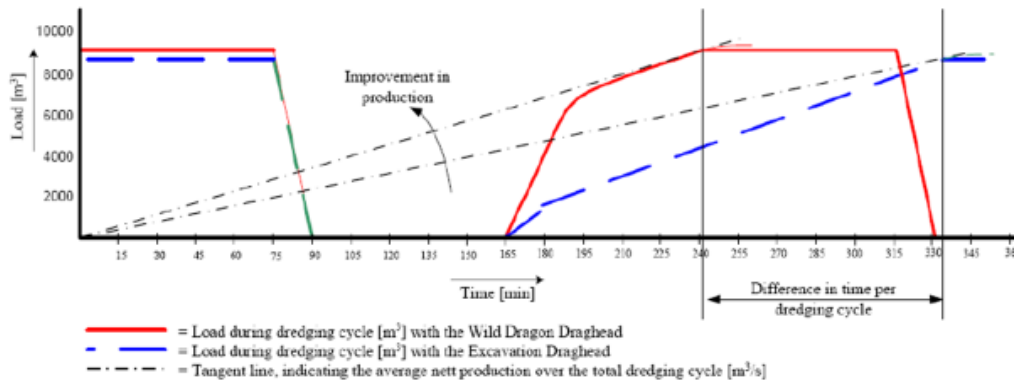


Fig. 12: Time plot of the total dredge cycle.

Figura 10.6 – Comparación producción cabezal Wild Dragon y convencional

Se recomienda que la carga que se expresa en este gráfico corresponda a TDS. En la Figura 10.7. se puede apreciar la diferencia entre aplicar el método a la variación del desplazamiento y aplicarlo a la curva calculada de TDS

OPTIMAL LOADING ACCORDING DEADWEIGHT OR DRY SOIL WEIGHT
(WITH DRAUGHT LIMITATIONS)

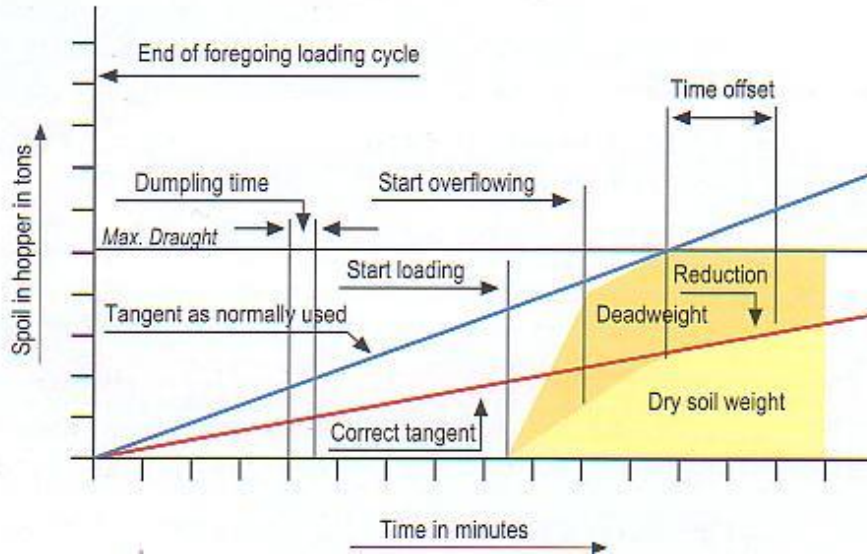


Figura 10. 7 – Comparación aplicación método de la tangente a medición de la carga por desplazamiento o TDS

10.7.2 Procedimiento numérico

El Cuerpo de Ingenieros de los EEUU utilizó para determinar el tiempo óptimo de dragado un procedimiento denominado Engineer Form 2590. Este formulario establece una hoja de cálculo manual basada en el seguimiento del tiempo de bombeo, tiempo total del ciclo y medición de la carga total. La carga total se determina como el volumen de material in situ calculado como el volumen de la cántara multiplicado por una relación constante dada para cada lugar.

En la referencia [Howell (2002)] se da un ejemplo de aplicación de esta planilla de cálculo

Se definen las siguientes variables

- t_p tiempo de bombeo
- T_p tiempo total de bombeo
- t_t tiempo de giro
- T_t tiempo total de giro
- T_L tiempo total de carga
- T_D tiempo total de descarga
- T_{cycle} tiempo total del ciclo
- s_p velocidad de la draga mientras bombea
- s_d velocidad de la draga mientras navega a la zona de descarga
- l_d distancia al sitio de descarga
- L volumen de la cántara (en yardas cúbicas)

Si se tiene una serie de datos de carga de la cántara y del tiempo total de bombeo se pueden definir dos relaciones que determinan el incremento de carga durante el bombeo

Expresado en forma incremental

$$R_i = \Delta L / \Delta T_p$$

m	time	T_p	t_t	T_L	T_d	T_{cycle}	L	R_L	R_I
1	1003	22	5	27	39	66	1850	28.0	84.1
2	1013	32	5	37	39	76	2430	32.0	58.0
3	1021	40	5	45	39	84	2780	33.1	43.8
4	1036	50	15	65	39	104	3050	29.3	27.0
5	1056	60	15	75	39	114	3290	28.9	24.0
6	1104	68	15	83	39	122	3470	28.4	22.5
7	1112	76	15	91	39	130	3630	27.9	20.0
8	1124	83	20	103	39	142	3730	26.3	14.3
9	1131	90	20	110	39	149	3770	25.3	05.7

Tabla 10.3 – Calculo tiempo óptimo de dragado

En este caso la igualdad se produce entre las mediciones número 3 y número 4. Por interpolación el tiempo óptimo de bombeo se determina en 44 minutos. Con tiempos menores de bombeo se desperdicia capacidad de cántara y con tiempos mayores se pierde tiempo.

10.7.3 Procedimiento computacional

Tal como se describe mas adelante en la actualidad se cuenta con elementos que permiten conocer todos los factores de operación de los equipos de dragado. Howell (2002) propone utilizar instrumental de medición en las dragas y transmisión de los datos a la oficina de control de manera de poder seguir todas las operaciones de la draga en tiempo real. Sobre la base de un esquema numérico determina el tiempo óptimo de dragado

Se discute cual es el tiempo óptimo de bombeo adicional una vez que se ha llenado la cántara. La discusión es si conviene seguir bombeando o parar el bombeo e ir lo más rápido posible al sitio de descarga. Propone un método automático basado en las mediciones que se efectúan en el buque. Una conclusión es que el tiempo óptimo de dragado está vinculado con la distancia a la que se encuentra el sitio de descarga. Si el sitio está lejos, conviene seguir bombeando para aumentar la carga. Si el sitio está cerca, conviene parar el dragado y navegar al sitio de descarga.

Los resultados obtenidos por Howell muestran que para sitios de descarga cercanos se pueden obtener disminución del orden del 30% en el ciclo total con reducciones del orden del 10 % en la carga de la draga. En su esencia el método propuesto por Howell es muy similar al método numérico con la diferencia que permite ir teniendo en cuenta viaje a viaje las variaciones que se producen en los diversos componentes del ciclo de dragado.

10.7.4 Inspector Silencioso (SI)

El sistema de monitoreo de dragado denominado Inspector Silencioso (Silent Inspector – SI) desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los EEUU [Rosati (2001)] mide la posición de la draga y su desempeño en tiempo real. El SI tiene la posibilidad de calcular los tiempos de bombeo, navegación y descarga junto con la carga de la cántara determinada en toneladas de suelo seco (TDS). El método utiliza TDS en lugar de volumen de suelo in situ. El método es muy similar al utilizado por el Ministerio de Obras Públicas de Holanda.

El SI determina, presenta y registra la cantidad de TDS a bordo de la draga de succión por arrastre en forma continua por cada ciclo de dragado. La información que se obtiene comprende tres elementos: los datos del ciclo de dragado incluyendo demoras, la carga de la cántara por cada ciclo de dragado y el posicionamiento de la draga en tiempo real.

El SI recolecta la información a partir de sensores instalados en el buque, calcula las actividades de dragado y muestra la información mediante informes con formato standard y representación gráfica. Además de calcular en forma automática la carga de la draga en TDS recolecta la información acerca de la posición del cabezal de dragado en tres dimensiones y las coordenadas de los sitios de dragado, navegación y descarga. Estos factores son necesarios para el pago de los trabajos al Contratista y para verificar que las tareas de dragado y de descarga se realizan en los lugares especificados en el contrato.

En la Figura 10.8 se presenta una imagen de la pantalla de la computadora en el Cuerpo de Ingenieros del Inspector Silencioso (SI) donde se aprecian los diferentes factores que se conocen en tiempo cuasi real



Figura 10. 8 – Pantalla Silent Inspector

El SI se ha adoptado como método obligatorio para todas las embarcaciones que realicen tareas de dragado en los EEUU ya sean propias del Cuerpo de Ingenieros o de contratistas a partir de año 2007. Todas las embarcaciones implica a las dragas de succión por arrastre, las dragas de cortador, las dragas de cangilones y a

las chatas barreras. Para poder cumplir con este requerimiento se siguió un cronograma bastante ajustado durante varios años. Además de utilizarlo para controlar las cantidades dragadas se utiliza también para controlar que el dragado se efectúe en los lugares previstos y que la descarga se haga en los lugares autorizados. Toda la información que se obtiene por este método se almacena en una base de datos central. Ya han aparecido otros organismos interesados en tener acceso a esta información, principalmente organismos vinculados con temas ambientales, protección de habitats y otros.

Seguramente la difusión de nuevas tecnologías que permiten un mejor seguimiento de las embarcaciones como los Sistemas de Identificación Automática (AIS) van a producir mejoras en el corto plazo en el SI

10.3 BIBLIOGRAFIA

Bray, R.N. Bray, R.N., Bates, A.D, and Land, J.M., (1997) "Dredging, a handbook for engineers", Second edition, John Wiley and Sons pp336-338

Hahlbrock, U. and Freese, I. (1998) "Hopper Load Measurement; Some Recent Experiences with a Remote-Operated Data Acquisition and Analyzing System" Terra et Aqua – Number 72 – September 1998

Howell, G, (2002) "Real time computation of economic loads for hopper dredgers" Dredging 2002, ASCE

Miedema, Sape A. (2012) "The loading process of a TSHD" 142 pp Apuntes del curso OE426 Dredging Processes para el programa de la maestría Offshore and Dredging Engineering – Delft University of Technology. Se puede conseguir gratis online

Ports and Dredging (2001) "Optimal loading of TSHDs"

Rosati, J (2000), "Initial Corps Experience with Tons Dry Solids (TDS) Measurement" USACE ERDC TN-DOER-I2 July 2000

Rosati, J (2001) "Silent Inspector Implementation Procedures for Hopper and Pipeline Dredges" USACE ERDC TN-DOER-I6 March 2001